

高信噪比云与气溶胶探测仪成像系统设计

李 帅^{1,2}, 徐抒岩¹, 刘栋斌¹, 张 航¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为获取高信噪比的气溶胶遥感数据, 针对光谱仪成像系统链路分析了影响云与气溶胶探测仪信噪比的关键因素。结合光谱仪成像电路系统的响应模型, 确定了电子学系统信噪比的表达式, 针对可见探测器和红外探测器。提出了模块化的高信噪比成像光谱仪电路系统的设计方法, 并描述了云与气溶胶探测仪成像电路系统从总体设计到模块设计的完整研制方案。对云与气溶胶探测仪进行辐射定标试验, 试验结果表明: 可见单机各通道在典型辐亮度条件下最小信噪比为 50.9 dB, 红外单机各通道在典型辐亮度条件下最小信噪比为 62.3 dB, 满足指标要求。针对可见探测器和红外探测器的成像电路系统设计方法对其他光谱仪电路系统设计具有借鉴意义。

关键词: 电荷耦合器件; 光谱仪; 信噪比; 云与气溶胶探测仪; 辐射定标

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1111006

Design of imaging system of cloud and aerosol polarization imager with high signal-to-noise ratio

Li Shuai^{1,2}, Xu Shuyan¹, Liu Dongbin¹, Zhang Hang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To capture the space-borne remote sensing aerosol data with high signal-to-noise ratio (SNR), according to the chain of the imaging system, the main factors on the SNR of spectrometer were presented. Combined with the imaging system response model and the expression of SNR, a modular design method for high SNR of spectrometer imaging circuit system was proposed for visible detectors and infrared detectors. From the overall design to the module design of Cloud and Aerosol Polarization Imager (CAPI) imaging circuit development plan was described. The radiation calibration experimental results indicate that the minimum SNR of visible channel image under typical radiance conditions is 50.9 dB, the minimum SNR of infrared channel image under typical radiance conditions is 62.3 dB. The design method of visible detectors and infrared detectors provides references for other spectrometer imaging circuit system in remote sensing fields.

Key words: CCD; spectrometer; signal-to-noise ratio; cloud and aerosol polarization imager; radiometric calibration

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家“863”计划重大项目(2011AA12A103); 国家“863”计划(2015AA123801-02)

作者简介: 李帅(1987-), 男, 博士生, 主要从事空间光学成像技术方面的研究。Email: lishuai8028@163.com

导师简介: 徐抒岩(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学遥感器计算机控制方面的研究。Email: xusy@ciomp.ac.cn

0 引言

大气气溶胶是指悬浮在大气中直径 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 固体和液体微粒组成的多相体系, 是大气辐射平衡和气候变化研究中的一个关键因素^[1-3]。多谱段云与气溶胶探测器 (Cloud and Aerosol Polarization Imager, CAPI) 作为定量测量的多光谱仪器, 立足满足温室气体的反演需要, 采用透射系统方案, 具备获取高精度云与气溶胶图像数据功能。

国内外报道了很多针对 CCD 传感器的成像电路系统设计方法^[4-6]。参考文献[4]针对电子倍增 CCD 传感器, 介绍了基于复杂可编程逻辑器件的时序控制方法, 并讨论了驱动电路的实现过程以及视频处理电路的具体实现方法。参考文献[5]利用全帧型 CCD 设计了高分辨率成像电路, 该系统采用现场可编程门阵列 (FPGA) 作为数据处理单元和控制中心, CCD 输出经过模拟前端处理并通过模数转换后送入 FPGA 进行缓存和整合, 通过低压差分信号 (LVDS) 接口发送至上位机。参考文献[6]针对 TDI (Time Delay Integration) CCD, 提出了一种“总-分-总”的成像电路系统设计方法, 并将该方法应用于吉林一号卫星 CCD 成像电路系统的设计中, 获得了高分辨率的图像数据。

随着红外探测器研制技术的快速发展, 关于红外成像电路系统设计的研究报道也逐渐增多^[7-9]。参考文献[8]针对“高分四号”卫星相机, 分析了大面阵红外探测器成像电路设计的特点和难点, 重点介绍了红外相机视频处理电路 FPGA 软件设计, 进行了成像试验并验证了设计方法的正确性。参考文献[9]论述了通过降低直流偏置电压噪声来降低红外焦平面阵列噪声的设计思路, 采用 ADI 公司的 AD8606 系列高精度低噪声运算放大器构成一个直流缓冲器来构建红外焦平面驱动电路。

针对 CAPI 探测器, 文中采用成像系统一体化和模块化的设计思想, 在分析影响成像系统信噪比关键因素的基础上, 提出了高信噪比云与气溶胶探测器可见光焦面和红外焦面成像电路设计的方法和流程, 并进行了辐射定标试验, 验证了设计方法的正确性。

1 成像电路系统信噪比分析

CAPI 采用基于线阵探测器推扫的工作方式, 将 400 km 幅宽的地物反射光谱经大气后上行照射光学镜头, 经光学系统成像后汇聚在镜头焦面上。在镜头焦面位置放置焦平面组件, 接收光学系统获取的地物光谱信息, 实现光电转换。成像电路系统将光学系统所获取的光谱图像信息采集并进行相应信号处理, 最终转化为数字信号, 按协议格式输出。

信噪比是评价成像电子学系统性能的重要指标。成像电路系统的组成框图如图 1 所示。地物反射光谱经过光学系统入射到可见和红外传感器组成的焦平面组件上, 由传感器完成光电转换后输出相应的模拟信号, 预放单元对探测器输出信号进行放大和阻抗匹配等处理, 然后输入到视频处理电路。预放单元是影响信噪比的关键组成部分。

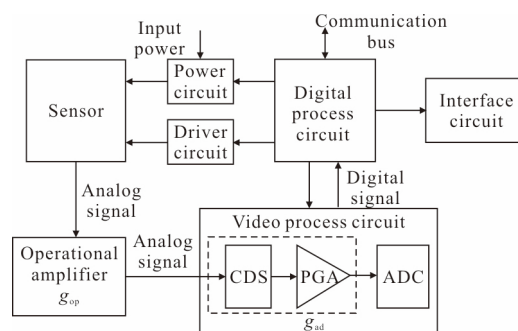


图 1 成像电路系统示意图

Fig.1 Sketch map of imaging circuit system

可见探测器具有专用的视频处理器, 一般都集成相关双采样功能、可变增益放大功能和模数转换功能。红外探测器的视频处理通常只需要进行模数转换即可, 因此视频处理电路模块的主要功能是对视频信号进行采集和量化, 完成数字量化后进入数字处理电路进行缓存和整合等处理。根据视频处理电路的特点, 在设计中常常将视频处理器作为模拟器件处理, 因此视频处理电路是影响信噪比的关键因素。

数字处理电路作为整个成像电路系统的控制核心, 主要实现数据处理、通讯控制、参数解析、驱动信号产生等功能。

驱动电路和偏置电路分别提供满足探测器工作需求的驱动时序和偏置电源, 是影响信噪比的关键环节。

探测器输出为模拟信号, 经过预放和数字量化处

理转变为数字信号,由于数字信号相比于模拟信号抗干扰能力更强,可以忽略数字电路部分对图像信噪比的影响,因此在整个成像链路中,模拟电路部分是影响图像信噪比的关键环节,主要包括时序驱动电路、预放电路、偏置电路以及视频处理电路四个部分。下面着重分析这四个组成部分对信噪比的影响。

假设驱动电路和偏置电路噪声分别为 n_p 和 n_d , 视频处理电路和预放电路的噪声分别为 n_{ad} 和 n_{op} , 视频处理电路和预放电路都对信号进行放大处理, 放大倍数分别是 g_{ad} 和 g_{op} , 那么成像系统噪声为:

$$n_{ad}=g_{ad} \times (g_{op} \times (n_p+n_d)+n_{op})+n_{ad} \quad (1)$$

对于 $h \times k$ 的图像, 根据 RMS 形式, 那么成像电路系统的噪声为:

$$n_c=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^k n_{ij}^2}{h \times k}} \quad (2)$$

成像电路系统的噪声不仅包括电路的工作噪声, 还包括探测器自身的暗电流噪声和散粒噪声等, 则成像电路系统的总噪声为:

$$n_{total}=\sqrt{n_c^2+n_s^2+n_d^2} \quad (3)$$

式中: n_s 为散粒噪声; n_d 为暗电流噪声。

根据典型工作条件估算多谱段云与气溶胶探测仪的信噪比, 信噪比 SNR 可表示为:

$$SNR=\frac{S_e}{n_{total}} \quad (4)$$

探测器接收到的光能量为像面照度、像元面积和积分时间的乘积, 由目标辐射产生的信号电子数 S_e 可表示为:

$$S_e=\left[\int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} E'(\lambda) A_d t_{int} \eta(\lambda) d\lambda\right] / (hc/\lambda) \quad (5)$$

式中: $E'(\lambda)$ 为像面光谱辐照度; A_d 为探测器像元的面积; t_{int} 为积分时间; $\eta(\lambda)$ 为探测器量子效率; h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为波长。

像面光谱辐照度 $E'(\lambda)$ 可以表示为:

$$E'(\lambda)=L(\lambda) \tau_o(\lambda) \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (6)$$

式中: $L(\lambda)$ 为仪器接收到的光谱辐亮度; $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统的光谱辐射传输效率; D/f 为光学系统的相对孔径。

由公式(4)可知, 在光照和温度确定的前提下, 为提高图像的信噪比, 应尽量降低成像电路系统的工作噪声。

2 云与气溶胶探测仪成像系统设计

由上述讨论可知, 偏置电路和驱动电路噪声影响最敏感, 其次是视频处理电路以及预放电路, 为提高云与气溶胶探测仪信噪比, 成像系统采用针对可见探测器和红外探测器一体化的设计思想, 主要围绕上述四个关键模块开展。

2.1 可见单机

CAPI 可见单机成像系统由探测器、模拟前端处理、视频信号处理、时序发生与控制、遥测、焦面二次电源等单元组成。为满足光谱仪系统在质量和体积等方面的指标要求, 结合光机系统设计同时获取高信噪比云与气溶胶图像, 抑制多片探测器之间的串扰噪声, 云与气溶胶探测仪可见单机成像电路系统电源与地平面拓扑结构如图 2 所示。

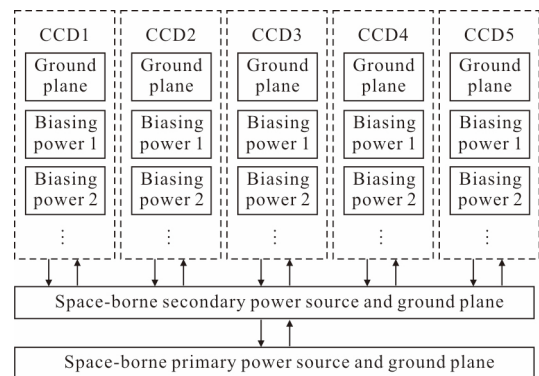


图 2 电源与地平面拓扑结构

Fig.2 Topology structure of power and ground plane

CAPI 可见单机选用五片三线阵 CCD 探测器 KLI-2113, 其由完全相同的三条平行光电二极管阵列组成, 每行具有 2 098 个有效像元、12 个测试像元和 12 个暗像元, 具有 76 dB 动态范围, 暗电流响应为 0.02 pA/pixel, 电荷转移效率 0.999 99。探测器结构框图如图 3 所示, 主要参数见表 1。

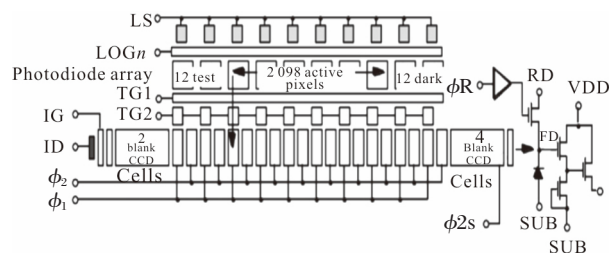


图 3 KLI2113 单通道原理图

Fig.3 Single channel schematic of KLI2113

表 1 KLI2113 主要参数

Tab.1 Main parameters of CCD KLI-2113

Parameter	Value
Pixels	2 098×3
Saturation output voltage/V	2.0
Dynamic range/dB	76
Saturation signal charge	170 000
Charge transfer efficiency	0.999 99
Dark current	0.02 pA/pixel
Output sensitivity	11.5 μ V/e

2.1.1 驱动电路

由于FPGA 输出的电平信号无法满足 CCD 驱动的电平要求,因此需要根据探测器驱动信号幅值、升降沿时间和容性负载等要求选择合适的驱动器,当驱动器驱动能力不能满足信号要求时,可采用多片驱动器进行并联的结构形式。对于该设计中的 CCD KLI-2113 驱动器选用 SNV54ACT245 来实现,根据 CCD KLI-2113 要求调整各驱动时序周期和相位关系,可以得到稳定的视频输出信号。

2.1.2 偏置电路

探测器需要的偏置电压见表 2。电源系统已为 CCD 成像系统提供了三种二次电源:A+15 V、A+5.5 V 和 D+5.5 V,因此利用线性稳压器进行电压转化就可以得到满足探测器工作需要的电源。

表 2 KLI2113 偏置电压要求

Tab.2 Typical bias voltage requirements of KLI2113

Symbol	Parameter	Value/V
V_{RD}	Reset drain bias	+12.0
V_{DD}	Output buffer supply	+12.0
V_{LS}	Light shield/Drain bias	+12.0
V_{IG}	Test pin-input gate/LOG	+12.0
V_{ID}	Test pin-input diode	+12.0

设计中选择线性稳压器 MSK5232,在简单阻容网络配合下就可以输出满足工作要求的偏置电压。原理图如图 4 所示。

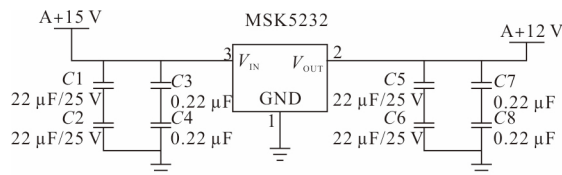


图 4 偏置电路设计

Fig.4 Circuit design of bias power

2.1.3 预放电路

由三极管 3DG111 构成放大电路,用以对 CCD 输出信号进行缓冲和匹配。采用交流耦合方式消除直流分量,降低直流功耗,抑制 $1/f$ 噪声。

2.1.4 视频处理电路

视频处理单元选用定制 Philips 公司生产的航天级视频信号处理器 OM7560, 主要实现暗电流校正、采样保持、可变增益放大和模数转换等功能,主要参数见表 3。

表3 OM7560 主要参数

Tab.3 Main parameters of OM7560

Parameter	Value
Resolution/bit	12
Sample rate/MHz	30
Input voltage/V	0-2
Input impedance/k Ω	63
Input capacitance/pF	1
PGA gain/dB	0-36

视频处理器作为高精度和高速模数转换芯片,在 PCB 设计中既有模拟电路部分又有数字电路部分,因此常常将视频处理器看作模拟器件。由于模拟信号是随时间变化的连续的电压和电流信号,它对于外界的干扰非常敏感;而电路中又有大量的数字器件并且数字电路工作在较高的频率,数字信号在其上升沿和下降沿位置会产生较高的高频成分,很容易对周围的模拟信号造成影响。因此在设计中要正确区分数字电源和模拟电源,在模拟地和数字地的连接点处通过磁珠连接来消除二者构成传导回路的可能性。电源引脚就近安置旁路电容以抑制电磁辐射干扰。

数字处理电路采用 FPGA 实现,基于数据整合、通讯控制、参数解析、冗余设计等对逻辑资源和存储容量的需求,选用 Xilinx 公司的 XQRV300 芯片,选用 XQR17V16 PROM 作为逻辑配置存储器。使用每片 CCD 三路输出中的两路信号并且互为备份,每路输出都有与其对应的预放电路和视频处理电路,提高设计的可靠性。

2.2 红外单机

CAPI 红外单机成像系统由探测器、模拟前端处理、视频处理与数字量化、时序发生与控制、遥测、焦面二次电源等单元组成。为了抑制多片探测器之间的串扰噪声,云与气溶胶探测仪红外单机成像电路系统电源与地平面拓扑结构与可见单机类似,此处不再赘述。

红外单机短波红外谱段探测器选用四片 XLIN 型线阵 InGaAs 探测器,主要技术指标见表 4。

表 4 InGaAs 探测器主要参数

Tab.4 Main parameters of InGaAs detector

Parameter	Value
Pixels	2 048×1
Dark current	0.5 pA@298 K
Gain settings/ff	5~830
Dynamic range	75:1 to 2 800:1
Spectral band/ μm	0.9~1.7
Outputs	2
Quantum efficiency	0.8

2.2.1 驱动电路

时序驱动单元为探测器的工作提供正确偏置电压的时序脉冲,是成像系统的关键单元,其驱动波形的质量直接决定了探测器输出信号质量。根据红外探测器驱动信号电平要求,通过选择 FPGA 合适的 I/O 输出电气标准可以保证输出满足驱动要求,因此设计中为了减少中间环节采用直接驱动的方式以提高设计的可靠性。

2.2.2 偏置电路

电源系统已为成像系统提供了多种二次电源,具体包括: A+5.5 V 和 D+5.5 V, 因此只需要利用线性稳压器将输入的二次电源变换为满足成像电路工作要求的偏置电源。

2.2.3 预放电路

预放电路主要功能是对红外探测器输出的视频信号进行缓冲和匹配放大,使输出的模拟信号满足后续数字量化单元的输入要求。由于探测器输出的差分信号与所选的 A/D 转换芯片输入的动态范围基本相同,因此预放电路只需对视频信号进行幅度调整即可,使探测器输出范围在 ± 2 V,满足 A/D 转

换芯片差分输入的要求。选择 AD8138 作为信号预放电路的运放器件,原理图如图 5 所示。设计中 $R_1=R_3=357\ \Omega$, $R_2=R_4=51\ \Omega$, $R_5=R_6=511\ \Omega$, $C_1=0.1\ \mu\text{F}$ 。

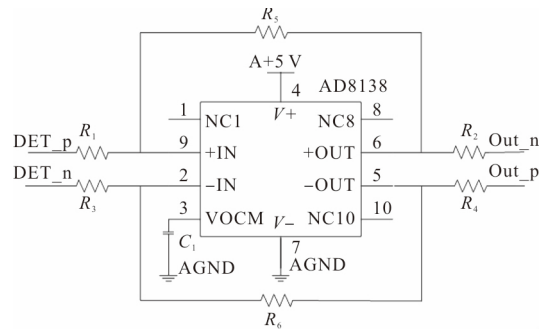


图 5 运放应用电路设计

Fig.5 Application circuit design of operational amplifier

2.2.4 视频处理电路

对于红外 InGaAs 探测器,由于其输出信号为直流电平,直接采用 TI 公司的 A/D 转换器 THS1206 实现数字量化。THS1206 是一款多通道、可编程、内置 FIFO 的高速 A/D 转换芯片。其具有四个模拟输入端,既可以作为四个单端输入又可作为两个差分输入,输入方式可以通过控制内部寄存器进行选择。THS1206 内置 16 字深度环形 FIFO,可进行数据存储,无需采集一次读取一次,这样能够多次采集数据后通知 FPGA 进行数据读取操作,减少由于数据读取而进行中断的次数。通过控制内部寄存器可以选择 THS1206 使用内部标准电压或外部输入电压作为参考电压。THS1206 主要参数见表 5。

表 5 THS1206 主要参数

Tab.5 Main parameters of THS1206

Parameter	Value
Resolution/bit	12
Signal-to-noise	68 dB at 2 MHz
Differential nonlinearity error	± 1 LSB
Integral nonlinearity error	± 1.5 LSB
Analog inputs	4
Power/mW	291(Max)
Analog input voltage/V	0.5~4.5

为了匹配探测器的 2 通道差分输出模式,设计中将 THS1206 输入配置为两个差分输入端口。使用

内部标准电压源作为参考电压,利用内置 FIFO 存储输入的图像数据,实现两个通道数据的同时获取,简化系统设计。

3 试验结果

为测试云与气溶胶探测仪成像电路系统的信噪比,首先完成光机电集成。可见单机包括 3 个镜头,分别是:镜头 1 对应 $0.38\ \mu\text{m}$ 通道、镜头 2 对应 $0.87\ \mu\text{m}$ 通道和 $0.67\ \mu\text{m}$ 的 0° 偏振通道、镜头 3 对应 $0.67\ \mu\text{m}$ 的 60° 偏振通道和 $0.67\ \mu\text{m}$ 的 120° 偏振通道,3 个镜头安装在同一主框架上。5 个探测器均为 KLI-2113 线阵列探测器,驱动和电源模块一体化设计,如图 6 所示。

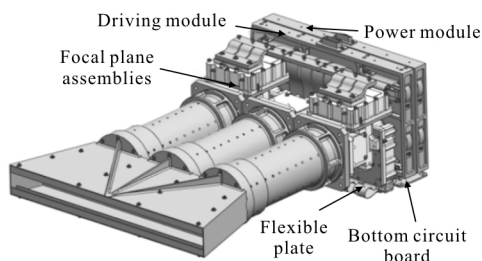


图 6 CAPI 可见波段光谱仪

Fig.6 Visible band spectrometer of CAPI

红外单机包括 3 个镜头,分别是:镜头 4 对应 $1.375\ \mu\text{m}$ 和 $1.64\ \mu\text{m}$ 的 0° 偏振通道、镜头 5 对应 $1.64\ \mu\text{m}$ 的 60° 偏振通道、镜头 6 对应 $1.64\ \mu\text{m}$ 的 120° 偏振通道,3 个镜头安装在同一主框架上。4 个探测器均为 InGaAs 线阵探测器,驱动和电源模块一体化设计,如图 7 所示。

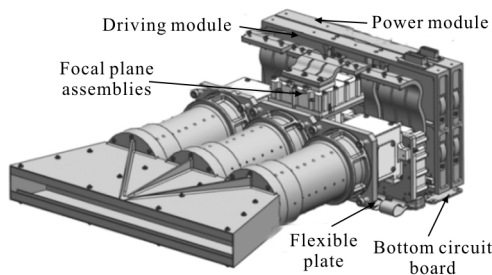


图 7 CAPI 红外波段光谱仪

Fig.7 Infrared band spectrometer of CAPI

对 CAPI 探测仪可见单机和红外单机分别进行实验室辐射定标试验,试验装置安装状态如图 8 所示。电源系统为成像电路系统提供各种二次电源,

图像快视设备实时监控并存储图像数据,由电控箱完成成像电路系统参数的设置。积分球光源能够充满仪器的全孔径和全视场。定标积分球作为均匀光源,其特性如下:输出光辐亮度 60 级可调;不稳定性 $<0.5\%/h$;色温 $3\ 000\ \text{K}$ 。试验环境条件要求:温度为 $20\pm 2\ ^\circ\text{C}$;相对湿度为 $40\%\sim 70\%$;并保证试验过程中实验室保持暗室状态。

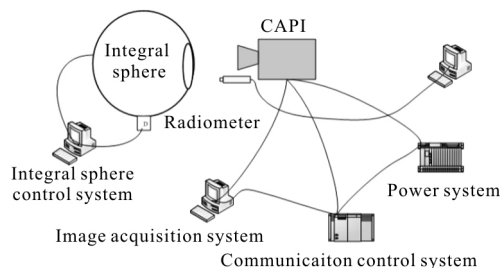


图 8 CAPI 辐射定标系统

Fig.8 Radiometric calibration system of CAPI

根据任务书指标要求,可见单机有效像元数不少于 $1\ 600$ 个点/扫描线(不合并输出),红外单机有效像元数不少于 400 点/扫描线(片上 4 个像元合并为一个点输出)。设计中采用地面注入起始像元参数的方式调节起始像元的位置,两个单机各选取 $1\ 600$ 个像元,可见单机不进行片上合并,通过后续地面数据处理进行四元合并,红外单机片上进行四元合并处理。试验中可见单机五个通道探测器起始像元参数分别设置为 0136H、00FBH、0110H、0105H 和 00FFH,红外单机 4 个通道探测器起始像元分别设置为 00D4H、00FDH、00F3H 和 00F2H。

各通道在特定入瞳亮度条件下的信噪比如图 9 所示,信噪比测试时入瞳亮度、典型辐亮度、指标要求信噪比和实测信噪比统计见表 6。可见单机各通道最小信噪比为 $50.9\ \text{dB}$,红外单机各通道最小信噪比为 $62.3\ \text{dB}$ 。在满足云与气溶胶探测仪指标要求的空间分辨率和光谱分辨率的前提下,采用像元合并技术能够提高系统的信噪比。像元合并技术是将探测器阵列 4 个相邻像素上的电荷在读出时作为一个值输出,此时信噪比为没有进行像元合并时的二倍。同时由于信噪比测试时红外单机的入瞳亮度和典型条件一致,而可见单机入瞳亮度小于典型条件,因此可见单机信噪比小于红外单机信噪比。

通过实测数据分析,在典型辐亮度下,系统信噪

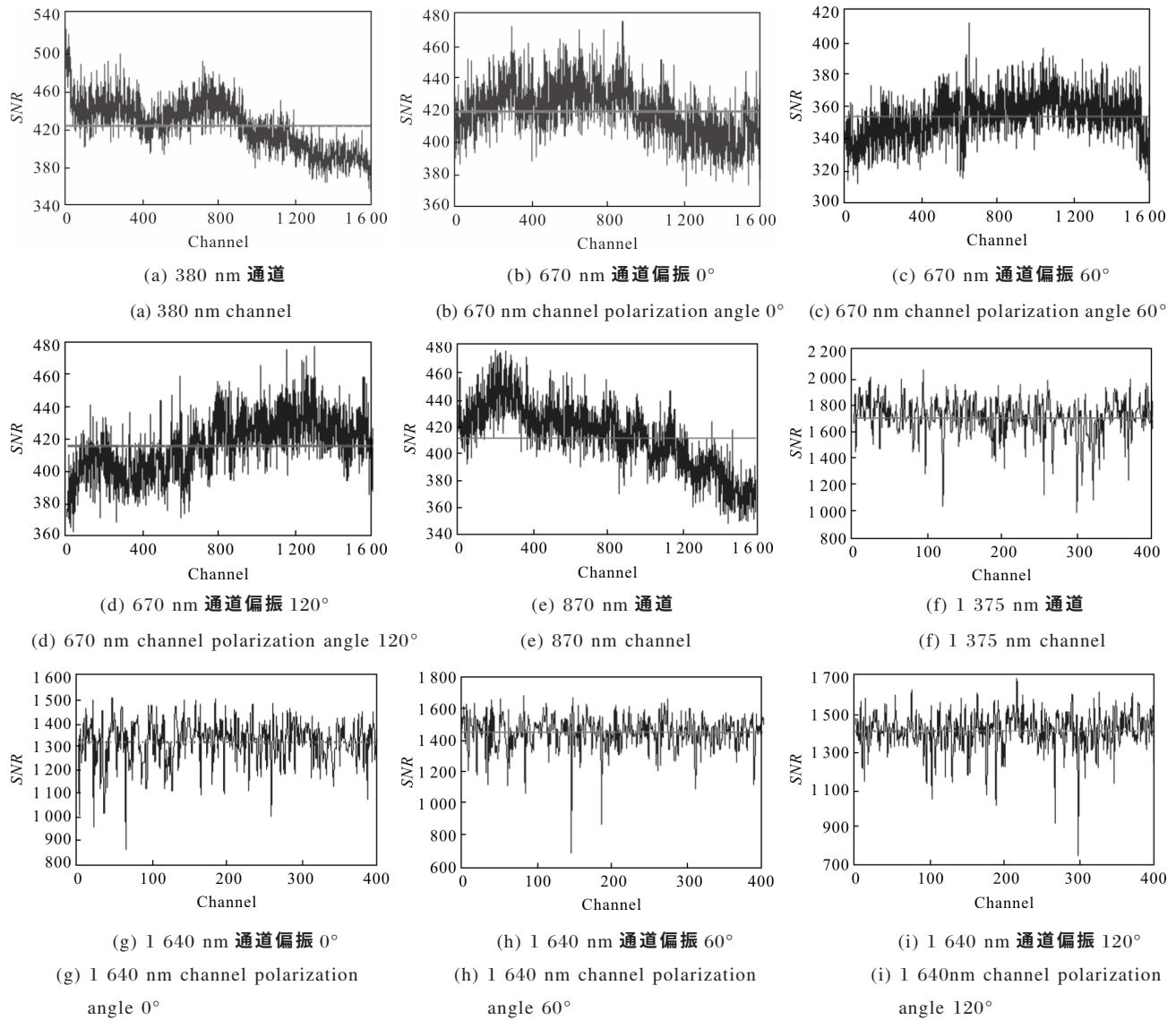


图 9 CAPI 实测信噪比

Fig.9 Measured SNR for CAPI

表 6 指标要求信噪比和实测信噪比

Tab.6 Required SNR and actual SNR

Number	Channel	Required SNR	Actual SNR	Radiance when SNR test $/(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$	Typical radiance $/(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$
1	380 nm channel	260	442	3.38	28.0
2	670 nm polarization angle 0°	160	419	13.88	22.0
3	670 nm polarization angle 60°	160	354	9.4	22.0
4	670 nm polarization angle 120°	160	415	6.88	22.0
5	870 nm channel	400	411	12.5	25.0
6	1 375 nm channel	180	1 686	6.0	6.0
7	1 640 nm polarization angle 0°	110	1 317	7.3	7.3
8	1 640 nm polarization angle 60°	110	1 442	7.3	7.3
9	1 640 nm polarization angle 120°	110	1 403	7.3	7.3

比满足指标要求和使用需求。

4 结 论

为获取高信噪比的气溶胶遥感数据, 针对成像系统链路分析了影响信噪比的关键因素。结合光谱仪响应模型, 确定了成像系统信噪比的表达式, 针对可见探测器和红外探测器, 提出了一体化和模块化的高信噪比成像电路设计方法, 描述了云与气溶胶探测仪成像电路系统从总体设计到模块设计的完整研制方案, 完成了可见单机和红外单机电路系统设计。完成光机电集成后进行了辐射定标试验, 试验结果表明各通道信噪比均优于指标要求, 从而验证了设计方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] Zhu Wenyue, Liu Qiang, Wu Yi. Aerosol absorption measurement at SWIR with water vapor interference using a differential photoacoustic spectrometer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23108–23116.
- [2] Luke Maidment, Zhang Zhaowei, Christopher R Howle, et al. Stand-off identification of aerosols using mid-infrared backscattering Fourier-transform spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2266–2269.
- [3] Zhang Junqiang, Xue Chuang, Gao Zhiliang, et al. Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: past, present and future [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 680–698. (in Chinese)
张军强, 薛闯, 高志良, 等. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 680–698.
- [4] Yang Shaohua, Guo Mingan, Li Binkang, et al. Design of digital EMCCD camera with mega pixels [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19 (12): 2970–2976. (in Chinese)
杨少华, 郭明安, 李斌康, 等. 百万像素电子倍增 CCD 数字化相机的设计[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(12): 2970–2976.
- [5] Xu Wenhai, Wu Houde. Design of ultra-high resolution CCD imaging systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1603–1610. (in Chinese)
许文海, 吴厚德. 超高分辨率 CCD 成像系统的设计[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(7): 1603–1610.
- [6] Zheng Liangliang, Jin Guang, Qu Hongsong, et al. Space-borne CCD imaging circuit system with high signal-to-noise ratio [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 2028–2036. (in Chinese)
郑亮亮, 金光, 曲宏松, 等. 高信噪比星载 CCD 成像电路系统[J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(8): 2028–2036.
- [7] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3146–3153. (in Chinese)
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3146–3153.
- [8] Liu Tao, Zhang Ye, Li Liang, et al. FPGA design of “GF-4” satellite large-array infrared camera video processing circuit [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(3): 109–115. (in Chinese)
刘涛, 张晔, 李亮, 等. “高分四号”卫星大面阵红外相机视频处理电路的 FPGA 设计 [J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38 (3): 109–115.
- [9] Zhang Pei, Zhu Hongbin, Lv Jian, et al. Design of the low noise uncooled infrared focal plane array driver circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (5): 806–810. (in Chinese)
张沛, 祝红彬, 吕坚, 等. 低噪声非制冷红外焦平面阵列驱动电路的设计[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(5): 806–810.